



挤压机前梁铸件充型过程数值模拟

史艳国¹, 刘振华², 张庆玲¹, 李敏³, 王陆军⁴

- (1. 燕山大学先进锻造成型技术与科学教育重点实验室,
河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北秦皇岛 066004;
2. 比亚迪股份有限公司, 广东深圳 518119;
3. 三一重机有限公司, 江苏昆山 215334;
4. 秦皇岛视听机械研究所, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 对挤压机前梁铸件充型过程进行分析, 设计合理的阶梯式浇注系统。首先, 根据挤压机前梁铸件的尺寸形状, 设计出阶梯式浇注系统。然后, 利用有限元软件 PROCAST 对初始工艺方案的流动场进行模拟分析, 并对初始工艺方案进行优化改进, 同时对优化后的工艺方案进行流动场的数值模拟。最后, 对初始工艺方案和优化工艺方案建立水力学模型, 并对这2种工艺方案下的钢液流动状态进行分析。通过分析验证, 优化工艺方案下铸件充型过程平稳, 不易产生缺陷。

关键词: 铸造工艺与设备; 大型铸钢件; 充型; 阶梯式浇注系统

中图分类号: TG244+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2013)20-1947-06

Numerical analysis of mold filling process for extrusion machine beam casting

SHI Yanguo¹, LIU Zhenhua², ZHANG Qingling¹, LI Min³, WANG Lujun⁴

- (1. *Key Laboratory of the Advanced Forging Technology and Science, Ministry of Education, Hebei Province Parallel Robot and Electromechanical System Laboratory, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;*
2. *BYD Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518119, China;*
3. *Sany Heavy Machine Co. Ltd., Kunshan, Jiangsu 215334, China;*
4. *Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)*

Abstract: In this paper, the extrusion machine front beam casting filling process was analyzed, and a reasonable step gating system was designed. Firstly, according to the shape of the size of the beam casting, a reasonable step gating system was designed. Then, the flow field analysis of the initial process was simulated using the finite element software PROCAST, and the initial process scheme was optimized. At the same time, the flow field of optimized process solutions were simulated. Finally, hydraulics models of the initial process and the optimization process were built, and the two kinds of process of liquid steel flow state were analyzed. The analysis showed that the optimal casting filling process was smooth, and did not produce defects easily.

Key words: technology and equipment of casting; large steel casting; filling; step gating system

0 引言

液态金属充型过程是铸件形成的第一个阶段, 许多缺陷都是在充型不利的情况下造成的。浇注系统设计不合理, 就会在浇注过程中产生乱引现象, 从而导致卷气、气渣、浇不足、冷隔及砂眼等缺

基金项目: 国家科技重大专项 (2009ZX04005-031)

作者简介: 史艳国 (1969—), 男, 教授, 主要研究方向: 虚拟制造技术、异地敏捷制造、网络化制造。E-mail: shi_yanguo@163.com

陷^[1~2]。挤压机前梁是挤压机主要受力构件之一,铸件质量要求较高,因此,为获得优质的挤压机前梁铸件,设计合理的浇注系统和工艺方案十分重要。传统的铸造工艺往往只是凭借铸造工艺人员的实际经验进行,常常需要反复试浇,进行超声波探伤和磁粉探伤等鉴定和分析后,才能得到一个合理的铸造工艺方案^[3~4]。而利用计算机有限元软件,可对铸件充型过程的流动场进行模拟计算处理,预测液态金属的流动状态,对工艺方案进行改进,制定出合理的工艺方案^[5~6]。通过计算机数值模拟计算,可大大缩短产品研发周期,降低成本,从而取得明显的经济效益^[7]。研究采用数值模拟和水力学计算2种方法对挤压机前梁铸件充型过程进行分析,以设计出合理的阶梯式浇注系统。

1 浇注系统的设计

大型铸钢件的生产常采用阶梯式浇注系统,通过设计出浇注系统的浇口杯、直浇道、横浇道、内浇道的截面积尺寸以及金属液在浇注系统中流动时的流动速度,从而保证充型过程的平稳性^[8]。

挤压机前梁铸件外形尺寸大小为6 000 mm×5 000 mm×2 800 mm,最小壁厚为150 mm,铸件质量为365 t,铸件三维立体模型如图1所示。

经过计算,选择包孔直径为100 mm,直浇道直径为140 mm,横浇道直径为140 mm,内浇道直径为100 mm,辅助直浇道直径为140 mm,连接直浇道直径为120 mm。采用四包同浇,浇注温度为1 550℃^[9],浇注速度为190 kg/s。利用UG软件对初始工艺方案下挤压机前梁进行三维造型,初始工艺模型如图2所示。

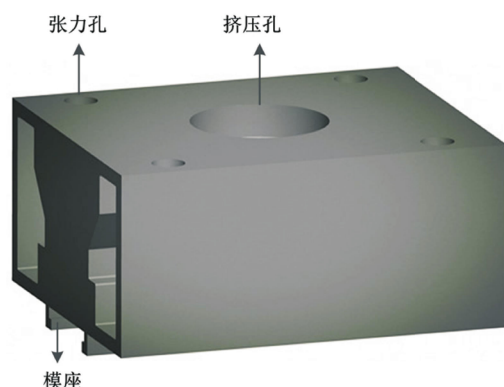


图1 铸件三维立体模型
Fig. 1 3D casting model

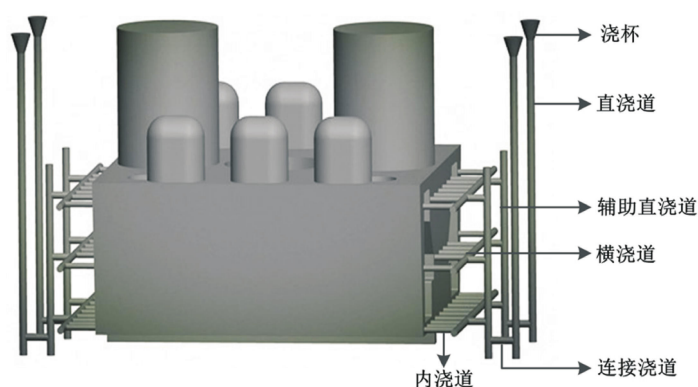


图2 初始工艺模型
Fig. 2 Initial process model

2 初始工艺方案充型过程数值模拟

初始工艺方案充型过程流动场的模拟结果如图3所示。

图3a为浇注开始,可以看出钢液在浇道内流速较快,最大速度为5 m/s,这样会使钢液冲坏型腔,进而导致铸件夹砂缺陷的发生。另外,钢液速度过快也会导致型腔内钢液产生漩涡、液面不平稳,进而使钢液产生卷气缺陷^[10]。图3b中发现钢液有逆流现象,说明浇注系统第三层浇道的浇注能力小,此时进入型腔的钢液主要是通过第一层和第二层浇道,这样就会导致铸件下面钢液的温度高于铸件上面的温度,从而不能保证铸件顺序凝固的原则^[11]。

3 铸造工艺方案的优化

针对初始工艺方案产生的缺陷,对初始工艺模型进行改进,具体工艺改进措施如下:

- 1) 将连接浇道提高至第一层内浇道高度处^[12]。
- 2) 将第二、三层内浇道直径改为120 mm,这样可以增加第二、三层内浇道钢水的流量,从而增

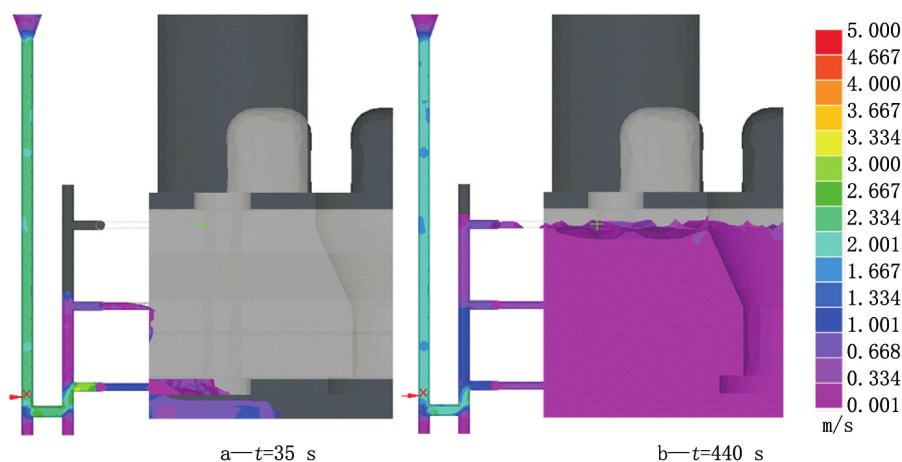


图3 初始工艺方案充型过程模拟
Fig.3 Initial filling process simulation

强铸件顺序凝固的原则。

3) 改变包孔的钢液流量, 在 0~20 s 处钢液的流量为 120 kg/s, 20~30 s 后增大包孔钢液流量至全速 190 kg/s, 30 s 包孔钢液流量保持全速为 190 kg/s^[13]。

4) 减小辅助直浇道顶端与第三层内浇道的高度差, 这样可以增大钢液在第三层内浇道处的内部压力^[14]。

优化后的工艺模型如图 4 所示。

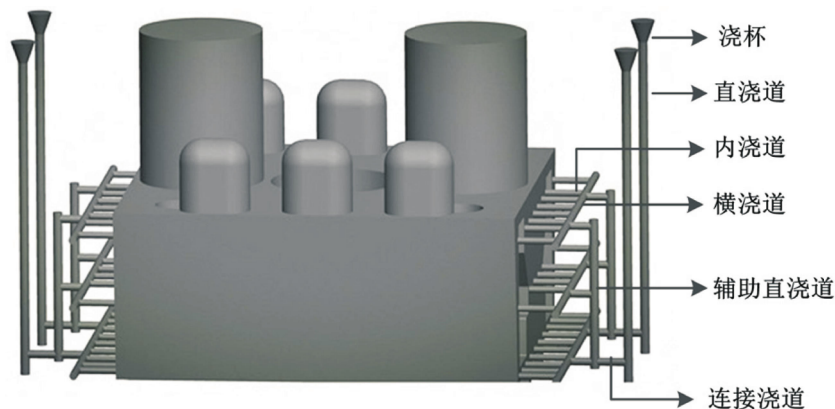


图4 优化工艺模型
Fig.4 Optimized process model

4 优化工艺方案充型过程数值模拟

优化工艺方案后充型过程流动场模拟结果如图 5 所示。

将图 3 与图 5 进行对比, 可以看出: 优化后的工艺方案, 钢水在铸型内最大流速为 2.788 m/s, 避免了因钢水在型腔内流动速度过快破坏砂型。整个浇注过程比较平稳, 浇注之初金属液只从最底层内浇道浇入型腔, 待型腔内液面上升接近第二层内浇道时, 才从第二层内浇道开始浇注, 待型腔内液面上升接近第三层内浇道时, 才从第三层内浇道开始进入型腔, 没有发生乱引现象。各层内浇道由下向上逐层接替起作用, 因而充型平稳, 无明显的速度波动和涡流, 有利于气体排出, 避免了卷气现象的发生, 同时防止了钢水由于乱引而导致钢水飞溅使得钢水氧化。充型完成后, 上部金属液的温度高于下部, 为铸件实现顺序凝固营造了良好的条件。由此可以看出, 优化后的浇注系统设计合理。

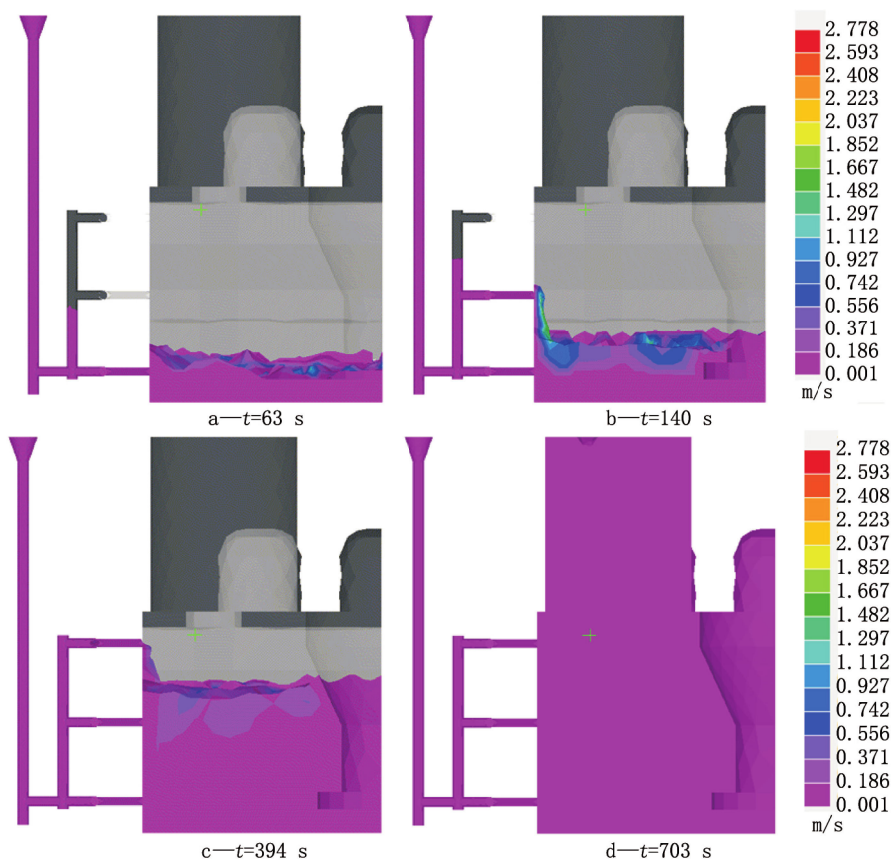


图 5 优化工艺方案充型过程模拟
Fig. 5 Optimized filling process simulation

5 2 种工艺方案的水力学分析

下面从浇注过程的水力学角度分析充型过程流动场，2 种方案的水力学模型如图 6 和图 7 所示。

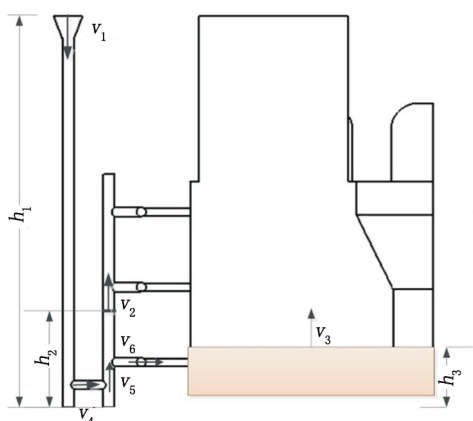


图 6 初始工艺方案水力学模型
Fig. 6 Hydraulic mode of initial process

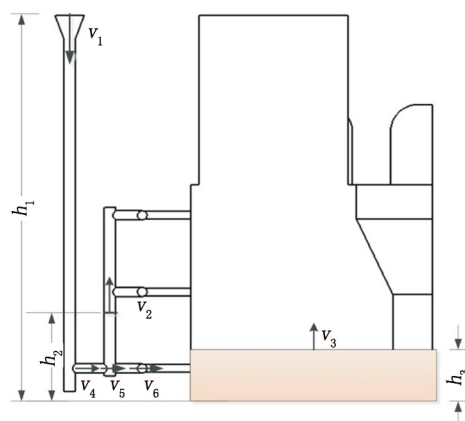


图 7 优化工艺方案水力学模型
Fig. 7 Hydraulic model of optimized process

v_1, v_2, v_3 分别为浇口杯截面、辅助直浇道内钢液高度截面、型腔内液面高度截面的钢液速度，钢液为不可压缩流体，根据一维非恒定动能量方程^[15]，可得

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P}{r} = \frac{v_3^2}{2g} + h_3 + \frac{P}{r} + h_{f1} + \frac{1}{g} \int_1^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds, \quad (1)$$

$$\frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P}{r} = \frac{v_3^2}{2g} + h_3 + \frac{P}{r} + h_{f2} + \frac{1}{g} \int_2^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds, \quad (2)$$

其中, h_1, h_2, h_3 分别为浇口杯、辅助直浇道、型腔内液面水头高度 (m); P 为钢水液面大气压力 (Pa); g 为重力加速度 (m/s^2); h_{f1}, h_{f2} 分别为钢液从浇口杯到辅助直浇道内液面高度的水头损失和辅助直浇道内液面高度至型腔内液面高度水头损失 (m)。

惯性水头自浇口杯截面到辅助直浇道内钢水上表面截面, 以及辅助直浇道内钢水上表面截面到型腔内钢水上表面截面的距离上单位重量钢液所做的功分别为 $\frac{1}{g} \int_1^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds$ 和 $\frac{1}{g} \int_2^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds$ 。

由于在充型过程中, 金属静压头变化缓慢, 所以充型速度变化不太明显, 因此 $\frac{1}{g} \int_1^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds$ 和 $\frac{1}{g} \int_2^3 \frac{\partial v}{\partial t} ds$ 值很小, 可以忽略不计^[16]。同时 v_1, v_2, v_3 相对于 v_4, v_5, v_6 而言比较小, 也可以忽略不计, 因此式 (1) 和式 (2) 可以简化为

$$\Delta h_1 = h_1 - h_3 = h_{f1}, \quad (3)$$

$$\Delta h_2 = h_2 - h_3 = h_{f2}. \quad (4)$$

钢液与耐火砖摩擦阻力较小, 因此沿程阻力损失可以忽略不计, 对于初始工艺方案, 有

$$h_{f1初} = (\xi_0 + \xi_3) \frac{v_6^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_5^2}{2g} + \xi_1 \frac{v_4^2}{2g}, \quad (5)$$

$$h_{f2初} = (\xi_0 + \xi_3) \frac{v_6^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_5^2}{2g}; \quad (6)$$

对于优化工艺方案, 有

$$h_{f1初} = (\xi_0 + \xi_3) \frac{v_6^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_5^2}{2g} + \xi_1 \frac{v_4^2}{2g}, \quad (7)$$

$$h_{f2初} = (\xi_0 + \xi_3) \frac{v_6^2}{2g}, \quad (8)$$

其中, $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \xi_3$ 分别为自内浇道钢液流出时、钢液在直浇道至连接浇道、连接浇道至辅助直浇道、辅助直浇道至内浇道拐弯处的阻力系数; v_4, v_5, v_6 分别为连接浇道、辅助直浇道、内浇道钢水流动速度。

因为, 初始工艺方案和改进工艺方案的直浇道、辅助直浇道、第一层内浇道尺寸相同, 所以有

$$h_{f1初} = h_{f1初化}, \quad (9)$$

$$h_{f2初} > h_{f2初化}. \quad (10)$$

由此可以得出: 初始工艺方案有效压头大于优化工艺方案的有效压头, 因此优化工艺方案与初始工艺方案相比不易发生乱引现象, 优化工艺方案更为合理。

6 结论

通过对 2 种工艺方案的数值模拟分析和水力学计算, 可以得出, 通过增加每层内浇道数量和改变浇道位置来实现充型过程的平稳和逐层浇注。分析表明: 优化工艺方案较为合理, 能够有效减少因乱引而产生的卷气、钢水氧化、夹砂等缺陷。

[参考文献] (References)

- [1] 王宁. 浇注系统对铸钢件质量影响的探讨[J]. 机械工人, 2005 (1): 81-83.
WANG N. Effect of gating system on the quality of steel analysis[J]. Mechanic, 2005(1): 81-83. (in Chinese)
- [2] XIONG C, MA Y C, CHEN B, et al. Modeling of filling and solidification process for TiAl exhaust valves during suction casting[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(1): 33-48.
- [3] 黄天佑, 刘小刚, 康进武, 等. 我国大型铸钢件生产的现状与关键技术[J]. 铸造, 2007 (9): 899-904.
HUANG T Y, LIU X G, KANG J W, et al. The review of the production status of heavy steel castings and key technologies for their manufacturing in China[J]. Foundry, 2007(9): 899-904. (in Chinese)
- [4] HONG J H, CHOI Y S, HWANG H Y. Diagnosis parameters of mold filling pattern for optimization of a casting system[J]. China Foundry, 2012, 9(4): 376-380.
- [5] ZHOU J X, LIU R X, CHEN L L, et al. Numerical simulation of casting's mold filling process[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2005, 18(6): 724-730.
- [6] 朱炳文. 大型铸钢件铸造工艺 cad 系统的研究与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
ZHU B W. The research and development of the large steel casting process cad system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] Anonymity. The world's largest steel casting poured successfully[J]. China Foundry, 2008, 5(3): 219.
- [8] 赵永让. 大型铸钢件浇注系统的设计原则[J]. 铸造技术, 2008 (10): 1425-1427.
ZHAO Y R. Design principle for the gating system of large steel casting[J]. Foundry Technology, 2008(10): 1425-1427. (in Chinese)
- [9] 秦涛, 徐年宝. 利用 Procast 探索浇注温度对转子质量的影响[J]. 现代铸铁, 2012 (3): 74-77.
QIN T, XU N B. Research on influence of pouring temperature on quality of rotor casting by using software Procast[J]. Modern Castiron, 2012(3): 74-77. (in Chinese)
- [10] WANG J Q, SUN X, GUAN Y, et al. Numerical simulation and process optimization for producing large-sized castings[J]. China Foundry, 2008, 5(3): 179-185.
- [11] 陆德平, 杨恩长. 阶梯式浇注系统的合理结构[J]. 江西科学, 1992 (4): 214-219.
LU D P, YANG E C. The reasonable structure of step gating system[J]. Jiangxi Science, 1992(4): 214-219. (in Chinese)
- [12] 刘文川. 大型铸钢件铸造工艺的优化设计[C]//第十二届全国铸造年会暨 2011 中国铸造活动周论文集. 广州, 2011.
LIU W C. The optimization of large casting steel process design[C]//Proceedings of the 12th Annual Meeting and 2011 Chinese National Casting Cycle. Guangzhou, 2011.
- [13] XU Z A, TOL R V, EVENEPOEL I, et al. Virtual analysis of influence of a filter on mould filling[J]. China Foundry, 2011, 8(4): 432-437.
- [14] 励崎, 夏琦明. 直浇道/横浇道控制浇道系统的应用[C]//第六届 21 省(市、自治区)4 市铸造学术会议论文集. 成都, 2004.
LI Q, XIA Q M. Application of sprue/runner ratio of controlling gating system[C]//Proceedings of the Sixth 21 Provinces (Municipalities and Autonomous Regions) Casting Academic Conference. Chengdu, 2004. (in Chinese)
- [15] 叶荣茂, 常庆明, 马振玫, 等. 阶梯式浇注系统流量分配计算的新方法——准伯努利方程[J]. 材料科学与工艺, 1994 (4): 65-70.
YE R M, CHANG Q M, MA Z M, et al. A new method of flow distribution calculation for step gating system: Bernoulli equation[J]. Materials Science and Technology, 1994(4): 65-70. (in Chinese)
- [16] CHANG Q M, CHEN X, CHEN C J, et al. Characteristics and influence factors of mold filling process in permanent mold with a slot gating system[J]. China Foundry, 2009, 6(4): 328-332.